

Gustavo Ari Valle

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AMOSTRADOR DE  
SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE PARA CÁLCULO DAS  
GRANDEZAS ELÉTRICAS REFERENTES À REDE E DO  
CONSUMO DE ENERGIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica/Eletrônica  
Orientador: Prof. Dr. Patrick Kuo Peng.

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Valle, Gustavo Ari

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AMOSTRADOR DE  
SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE PARA CÁLCULO DAS  
GRANDEZAS ELÉTRICAS REFERENTES À REDE E DO CONSUMO DE  
ENERGIA. / Gustavo Ari Valle ; orientador, Patrick  
Kuo Peng, 2018.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,  
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

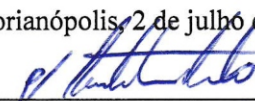
1. Engenharia Elétrica. 2. Medidor de energia.  
3. Faturamento. 4. Qualidade de energia. I. Kuo  
Peng, Patrick. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

Gustavo Ari Valle

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AMOSTRADOR DE  
SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE PARA CÁLCULO DAS  
GRANDEZAS ELÉTRICAS REFERENTES A REDE E DO  
CONSUMO DE ENERGIA.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica/Eletrônica e  
aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora

Florianópolis, 2 de julho de 2018.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.  
Orientador (a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Laurent Didier Bernard, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Adrisson Consoni Floriano, Bel.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado aos meus pais, Ari e Janeti, aos meus irmãos Gabriel e Guilherme, aos meus avós, Wilson e Edith, e Alvim e Elza (*in memoriam*), e a toda a minha família.



## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo agradeço a Deus. Em seguida, agradeço aos meus pais Ari e Janeti por sempre me apoiarem, trabalharem muito e fazerem de tudo para me ajudar a alcançar meus objetivos. Foi graças ao esforço de vocês que tive a oportunidade de cursar e concluir essa graduação. Aos Brutos, pois sem esse grupo os últimos anos não teriam sido os mesmos. Juntos rimos, brigamos, aprendemos, crescemos e superamos todos os desafios da graduação. Ao Adrisson, que me ensinou muito do que eu sei sobre medidores de energia e dedicou seu tempo e conhecimento para analisar e sugerir melhorias para esse trabalho. A todos os meus familiares e amigos por todo o apoio. À UFSC e aos professores por todos os conhecimentos fornecidos. Ao Shibaura Institute of Technology, por também ter feito parte da minha formação acadêmica. A todos que de alguma forma também contribuíram de para que eu chegasse até aqui.





## RESUMO

Medidores de energia são dispositivos capazes de monitorar o consumo de energia elétrica. Esses dispositivos normalmente são utilizados por distribuidores para controlar o faturamento da energia, geradores para controlar a quantidade e a qualidade da energia fornecida, bem como consumidores para controlar a quantidade e qualidade da energia consumida. Durante muito tempo esses medidores utilizavam métodos eletromecânicos para fazer esse monitoramento, porém, com o aumento de tamanho e de complexidade dos sistemas elétricos, esses medidores começaram a ter outras finalidades além do faturamento, como, por exemplo, monitoramento da qualidade da energia trafegada na rede. Com isso surgiram os medidores eletrônicos de energia elétrica, que utilizam métodos mais sofisticados para medir consumo e outras características da rede elétrica, permitindo um funcionamento mais eficiente e um controle mais centralizado do sistema elétrico. O objetivo desse trabalho é desenvolver um medidor eletrônico de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Medidor de energia. Faturamento. Qualidade de energia.



## ABSTRACT

Energy meters are devices that can monitor the consumption of electricity. These devices are typically used by distributors to control energy billing, producers to control the amount and quality of the energy supplied, as well as consumers, to control the amount and quality of the energy consumed. For a long time, these meters used electromechanical methods to perform this monitoring, but, with the increase in size and complexity of the electrical systems, these meters began to have other purposes besides the billing, as, for example, monitoring the quality of the energy trafficked in the network. With this came the electronic meters of electric energy, which use more sophisticated methods to measure consumption and other characteristics of the electrical network, allowing a more efficient operation and a more centralized control of the electrical system. The objective of this work is to build an electronic meter of electric energy.

**Keywords:** Energy meters. Billing. Energy quality.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação interna de um medidor.....	27
Figura 2 - Diagrama representativo do funcionamento de um medidor eletrônico de energia elétrica.....	32
Figura 3 – Raspberry Pi 3 <i>Model B</i> .....	35
Figura 4 – Diagrama de blocos representativo da Raspberry Pi 3 <i>Model B</i> .....	36
Figura 5 – Representação dos níveis de quantização de um sinal .....	37
Figura 6 - Representação de um sensor de efeito hall na ausência de um campo magnético .....	39
Figura 7 - Representação de um sensor de efeito hall na presença de um campo magnético .....	39
Figura 8-Diagrama representativo do comportamento do medidor construído.....	40
Figura 9-Circuito amostrador de tensão .....	41
Figura 10 – Circuito de uma das fases do amostrador de tensão.....	43
Figura 11 – Circuito energizado pela fonte de tensão alternada .....	43
Figura 12 – Circuito energizado pela fonte de tensão contínua .....	44
Figura 13 - Curva Tensão x Corrente do sensor de efeito hall ACS71246	
Figura 14 - Montagem do circuito em protoboard .....	47
Figura 15 - Sinal de saída do circuito de entrada de tensão .....	48
Figura 16 - Primeira montagem do dispositivo .....	49
Figura 17 - Design do circuito impresso .....	50
Figura 18 - Montagem interna do dispositivo sem o Raspberry Pi .....	51
Figura 19 - Diagrama representativo do loop principal do <i>software</i> do medidor .....	53
Figura 20 - Tela de consulta do diagrama fasorial do medidor .....	57
Figura 21 - Tela de consulta de oscilografia do medidor .....	58



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Associação entre amplitudes e valores binários .....	38
Tabela 2 - Definição dos ângulos dos fasores de cada sinal.....	55
Tabela 3 - Custos do Projeto .....	67





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D – Conversor Analógico/Digital

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

HTML – *HyperText Markup Language* (Linguagem de Marcação de Hipertexto)

INEP – Instituto de Eletrônica de Potência

ONS – Operador Nacional do Sistema

PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de circuito impresso)

RAM – *Random Access Memory* (Memória de acesso aleatório)

RMS – *Root Mean Square* (Valor quadrático médio)

USB – *Universal Serial Bus* (Interface Serial Universal)



## LISTA DE SÍMBOLOS

### UNIDADES

$\Omega$  – Ohm.  
 $\Delta$  – Delta.  
 $\theta$  - Theta  
 $^{\circ}$  – Grau  
A – Ampére  
B – Byte  
Hz – Hertz  
rad – Radiano  
s – Segundo  
V – Volt  
W – Watt

### PREFIXOS

G – Giga ( $10^9$ )  
M – Mega ( $10^6$ )  
k – Quilo ( $10^3$ )  
c – centi ( $10^{-2}$ )  
m – mili ( $10^{-3}$ )  
u – micro ( $10^{-6}$ )  
n – nano ( $10^{-9}$ )

### SÍMBOLOS UTILIZADOS NOS DIAGRAMAS ELÉTRICOS OU CÁLCULOS

$\Delta$  – Limiar de quantização  
 $\theta$  – Fase  
GND – *Ground*(Terra)  
*Eaparente* – Energia aparente  
*Eativa* – Energia ativa  
*Ereativa* – Energia reativa  
I – Corrente  
 $I_p$  – Corrente de pico  
 $I_{rms}$  – Corrente eficaz

P – Potência ativa  
Q – Potência reativa  
R – Resistência  
RTC – Relação de transformação de corrente  
RTP – Relação de transformação de potencial  
S – Potência aparente  
TC – Transformador de corrente  
TP – Transformador de potencial  
V – Tensão  
V<sub>cc</sub> – Tensão de corrente contínua  
V<sub>p</sub> – Tensão de pico  
V<sub>rms</sub> – Tensão eficaz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	28
1.2	RECOMENDAÇÕES DE USO .....	29
1.3	OBJETIVOS .....	29
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>29</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	HISTÓRIA DOS MEDIDORES DE ENERGIA .....	31
2.2	FUNCIONAMENTO DE UM MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA .....	32
2.3	AMOSTRAGEM DE SINAIS .....	33
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>35</b>
3.1	PRINCIPAIS COMPONENTES DO PROJETO.....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Raspberry Pi.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Conversores Analógico-Digitais.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Sensores de efeito Hall .....</b>	<b>38</b>
3.2	PROJETO E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO.....	40
<b>3.2.1</b>	<b>Diagrama de funcionamento do medidor.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Descrição do circuito.....</b>	<b>41</b>
3.3	ESCOLHA DOS COMPONENTES.....	42
<b>3.3.1</b>	<b>Cálculo dos resistores.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Compra dos componentes.....</b>	<b>45</b>
3.4	MONTAGEM EM PROTOBOARD .....	47
3.5	PRIMEIRA MONTAGEM DO CIRCUITO E TESTES .....	48
3.6	DESIGN E FRESA DA PLACA .....	50
3.7	MONTAGEM DO CIRCUITO E TESTES .....	51
3.8	PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.....	52
<b>3.8.1</b>	<b>Descrição do funcionamento .....</b>	<b>52</b>
<b>3.8.2</b>	<b>Cálculos das grandezas elétricas.....</b>	<b>54</b>

3.8.2.1	Valores eficazes .....	55
3.8.2.2	Fator de potência.....	56
3.8.2.3	Potências .....	56
3.8.2.4	Energias .....	56
3.9	TESTES E RESULTADOS.....	58
<b>3.9.1</b>	<b>Problemas encontrados .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>65</b>
<b>APÊNDICE A – Tabela de custos do projeto .....</b>		<b>67</b>





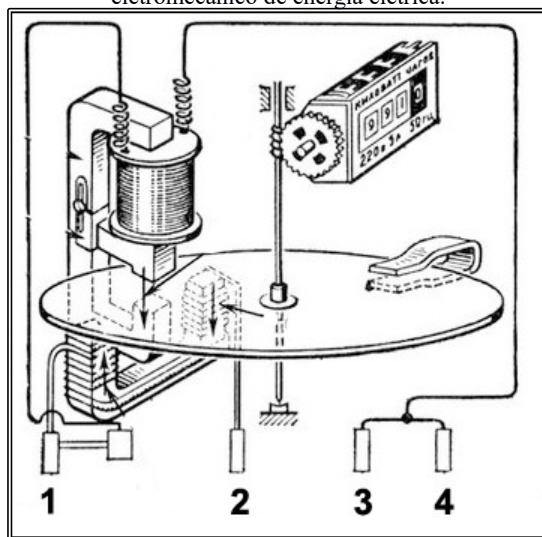


## 1 INTRODUÇÃO

A partir do início do século XX, os medidores eletromecânicos de energia, que informavam o consumo em quilowatt-hora, surgiram e dominaram a medição de consumo de energia devido ao baixo custo e alta confiabilidade, motivos pelos quais esses medidores ainda são os mais utilizados até hoje, principalmente em aplicações de grupo B, ou seja, de consumidores em baixa tensão.

O funcionamento desses medidores é muito simples e representado na imagem a seguir:

Figura 1 - Representação interna de um medidor eletromecânico de energia elétrica.



Fonte: Nova Eletrônica

O medidor possui um par de bobinas de corrente pelas quais trafega a corrente de linha (de 1 para 2), e, uma bobina de potencial ligada entre a fase (1) e o neutro (3 e 4). Ambos os enrolamentos são construídos sobre uma estrutura metálica de forma a criar dois circuitos magnéticos. Um disco leve de alumínio é suspenso na região do campo magnético criado pelas bobinas de corrente. Nesse disco são induzidas correntes de Foucault que induzem uma força sobre o disco fazendo-o girar sobre o próprio eixo. O número de rotações do disco é proporcional à energia

consumida pela carga em um determinado intervalo de tempo, retornando à medida em quilowatt-hora. (PINCHEMEL, 2012).

A partir dos anos 1960, os primeiros medidores eletrônicos começaram a ser fabricados, permitindo não apenas uma medição do consumo em quilowatt-hora, mas também, a análise de outras grandezas referentes ao sistema elétrico.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No fim dos anos 90 o setor elétrico brasileiro migrou de um monopólio estatal para um modelo de mercado. A complexidade desse novo modelo, com a introdução de diferentes agentes nas áreas de geração, transmissão e comercialização de energia exigiu uma adequação da estrutura do sistema, sendo, uma dessas adequações, o surgimento de um órgão regulador do setor elétrico, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o objetivo de normatizar políticas estabelecidas pelo governo para o setor elétrico e dirimir conflitos entre os atores do setor.

Anos depois, o novo modelo instituiu o Operador Nacional do Sistema (ONS), responsável por coordenar a operação centralizada do sistema interligado brasileiro, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que regula a negociação de energia no mercado livre. (ANEEL, 2008).

Dentro desse novo modelo do setor elétrico, todo consumidor, gerador, ou distribuidor de energia elétrica tem a necessidade de controlar a quantidade de energia que entra, sai ou trafega pelo seu sistema, gerando uma grande demanda pelos dispositivos registradores de consumo de energia, de forma que, dado o tamanho do sistema, os dispositivos eletromecânicos não são mais a melhor solução aplicável, uma vez que torna-se cada vez mais necessário um controle centralizado dessas medições.

Essa necessidade abre espaço para os medidores eletrônicos, capazes de efetuar medição tão precisa quanto os medidores eletromecânicos, com a vantagem de que alguns modelos são capazes de informar esses valores via canais de telecomunicação.

## 1.2 RECOMENDAÇÕES DE USO

Esses medidores eletrônicos são de uso recomendado a órgãos responsáveis pelo monitoramento centralizado do sistema elétrico, uma vez que alguns modelos permitem a obtenção quase instantânea da informação referente ao consumo de energia, e, em casos mais específicos, às grandezas de engenharia relacionadas ao sistema, como valores médios de tensões e correntes em determinados horários.

São de uso recomendado também a grandes consumidores de energia preocupados com a redução de gastos através de efficientização de seus sistemas elétricos, transmissoras e distribuidoras de energia, permitindo rápida identificação de problemas nas linhas, e geradoras, permitindo um controle da estabilidade das grandezas de engenharia de seus sistemas.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Realizar a montagem completa de um medidor eletrônico de energia, desde a parte de *hardware*, com os circuitos de tratamento e amostragem dos sinais da rede, quanto o *software* que o operará embarcado em um microprocessador para fazer a aquisição e processamento dos dados medidos, e permitirá o acesso remoto desses dados através de uma página *web* em HTML.

### 1.3.2 Objetivos específicos

A montagem do medidor será feita a partir de um circuito analógico contendo transformadores de tensão, circuitos de resistores para tratar os sinais, sensores de efeito hall para a leitura da corrente, e amplificadores operacionais isoladores para proteger as entradas do microprocessador de correntes e tensões muito elevadas.

Uma vez que as entradas forem apropriadamente tratadas para serem lidas pelo microprocessador, o resto do processo será executado pelo *software* programado dentro dele, que fará a amostragem dos sinais de entrada a uma taxa superior a duas vezes a frequência da rede de acordo com o teorema de Nyquist, extrairá valores eficazes da tensão e corrente elevando os valores ao quadrado e calculando a média, e os multiplicará para o cálculo da potência aparente.

Em seguida, tendo amostras das ondas, o *software* utilizará o valor da primeira amostra e do primeiro pico de cada uma das ondas para estimar o fasor referente a cada uma delas. Com o ângulo dos fasores de tensão e de corrente de cada fase o *software* irá calcular o fator de potência, dessa forma será possível extrair a potência ativa e reativa do sistema. Por fim, os valores de potência poderão ser integralizados em um período para calcular as energias ativas e reativas.

Esse comportamento será replicado para mais duas fases, tornando esse medidor capaz de medir e retornar grandezas trifásicas.

Além disso esse medidor irá disponibilizar as informações medidas em uma página hospedada nele mesmo, permitindo o acesso remoto dessas informações através de qualquer computador com acesso à rede local na qual o medidor estiver conectado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A medição de energia elétrica é empregada, na prática, para possibilitar à entidade fornecedora o faturamento adequado da quantidade de energia elétrica consumida por cada usuário, dentro de uma tarifa estabelecida. (MEDEIROS FILHO, 1983).

### 2.1 HISTÓRIA DOS MEDIDORES DE ENERGIA

Segundo Pinchinel (2012), O primeiro medidor destinado a quantificação de consumo de energia elétrica conhecido foi desenvolvido e patenteado por Samuel Gardiner, em 1872, com aplicação em corrente contínua, indicando o período que uma lâmpada permanecia acesa em unidade lâmpada-hora. O cálculo do consumo desse medidor se dava basicamente pelo produto entre o tempo ligado e a potência nominal da carga, uma vez que ela era anteriormente conhecida.

Em 1880, Thomas Edison desenvolveu o primeiro medidor de quantidade de eletricidade, cujo funcionamento utilizava processos químicos.

Em meados de 1880, Elihu Thomsom desenvolveu um wattímetro-registrador destinado a medição de consumo de energia, capaz de operar em corrente alternada ou contínua, que em 1889 foi intensamente utilizado, e permaneceu como principal meio de medição de consumo de energia até 1892 quando foi substituído pelos medidores de watt-hora desenvolvidos por Thomas Duncan, que tinham precisão e confiabilidade suficientes para aplicação em medição de consumo de energia. Inicialmente esses medidores de watt-hora foram construídos para medição monofásica, mas foram adaptados para medição polifásica pouco tempo depois.

Foi no início do século XX que os medidores mais usados atualmente começaram a ser fabricados, são esses os medidores eletromagnéticos de indução.

De acordo com Medeiros Filho (1983), o emprego desses medidores se dá pela sua simplicidade, robustez, exatidão e desempenho ao longo dos anos.

## 2.2 FUNCIONAMENTO DE UM MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA

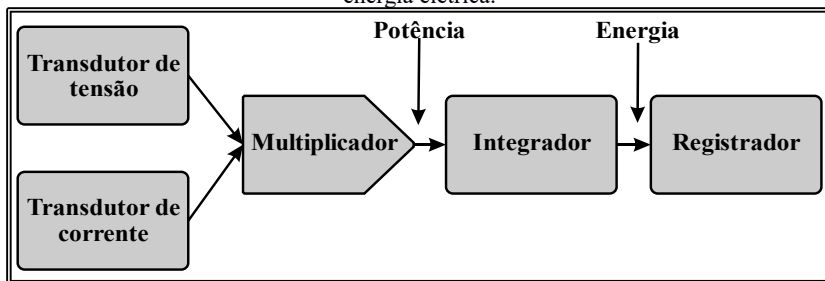
Segundo Mínguez (2007), A tecnologia atual de medição eletrônica garante melhor exatidão que os medidores eletromecânicos, oferecendo informações detalhadas sobre o consumo e podendo ser monitorado à distância via modem ou internet.

Através desses dados, o sistema de distribuição de energia pode ser mais bem dimensionado e o consumidor pode receber uma energia de melhor qualidade, com menos variação e menos interrupção no fornecimento.

Dentre as principais vantagens do medidor eletrônico de energia, pode-se destacar a automação do processo de aquisição dos dados, e ganhos na exatidão.

A figura a seguir mostra o diagrama de um medidor eletrônico, onde se pode ver os princípios de funcionamento do mesmo, assim como os componentes básicos necessários para fazer a medição de energia elétrica:

Figura 2 - Diagrama representativo do funcionamento de um medidor eletrônico de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Mínguez (2007)

Os transdutores de tensão e corrente são responsáveis por receber os sinais de entrada do medidor e adequá-los de modo a serem multiplicados. A potência é obtida através do bloco multiplicador. A energia é obtida através do bloco integrador, finalmente esse valor é armazenado e registrado no bloco registrador. (MÍNGUEZ, 2007, p. 18)

## 2.3 AMOSTRAGEM DE SINAIS

Um sinal no tempo contínuo pode ser processado, a partir de suas amostras, por um sistema que opere em tempo discreto. Para isso, é importante manter a taxa de amostragem do sinal suficientemente alta para permitir a reconstrução sem erro do sinal original. O fundamento necessário para esse propósito é fornecido pelo teorema da amostragem, que diz que um sinal limitado em faixa  $B$  Hz pode ser reconstituído exatamente de suas amostras se a taxa de amostragem desse sinal for de  $2B$  Hz. (LATHI, 2007)

O teorema descrito acima não será provado nesse trabalho, mas, vale adicionar que para efeitos práticos, uma taxa de  $2B$  Hz por si só não é suficiente para garantir a reconstituição exata do sinal amostrado, uma vez que o processo de reconstituição envolve a utilização de filtros, que por sua vez não são ideais, necessitando de uma margem extra na taxa de amostragem especificada pelo teorema.





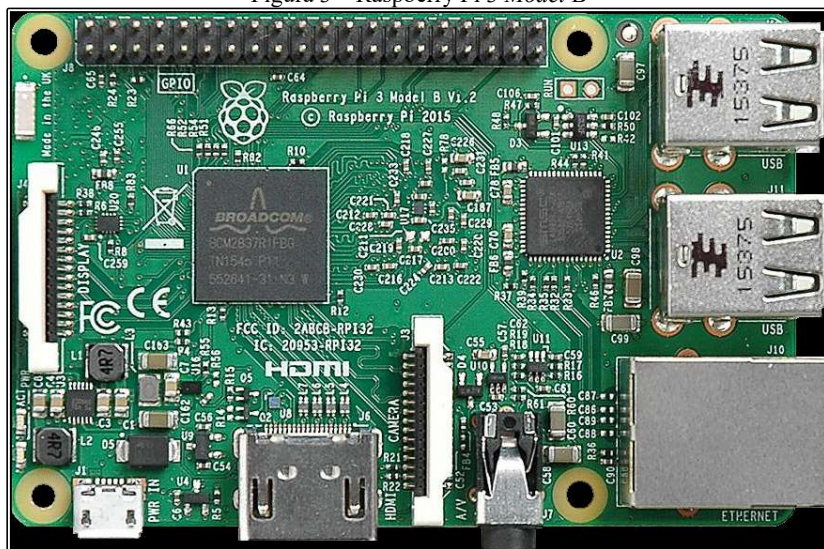
## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DO PROJETO

#### 3.1.1 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um microcomputador de baixo custo construído em apenas uma placa do tamanho aproximado de um cartão de crédito. Ele conta com uma configuração de *hardware* razoável para um dispositivo de seu tamanho e permite o embarque de sistemas complexos em dispositivos compactos.

Figura 3 – Raspberry Pi 3 Model B



Fonte: Wikipédia (2018)

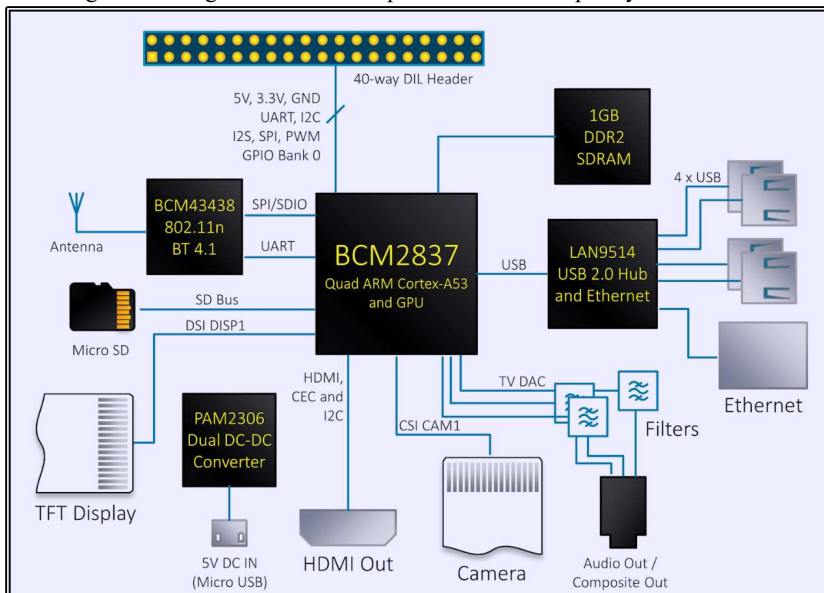
As principais características desse microcomputador são:

- Processador *Quad Core* 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit
- 1GB de memória RAM
- BCM43438 WiFi e Bluetooth de baixa energia (BLE)
- Interface GPIO de 40 pinos
- 4 portas USB 2.0
- Saída de áudio estéreo
- Saída HDMI

- Conexão para câmera CSI
- Conexão para *display* DSI
- Entrada para Micro SD
- Entrada Micro USB para alimentação

Um diagrama de blocos descrevendo as principais partes do Raspberry Pi 3 *Model B* pode ser visto na imagem abaixo:

Figura 4 – Diagrama de blocos representativo da Raspberry Pi 3 *Model B*



Fonte: Xdevs.com (2018)

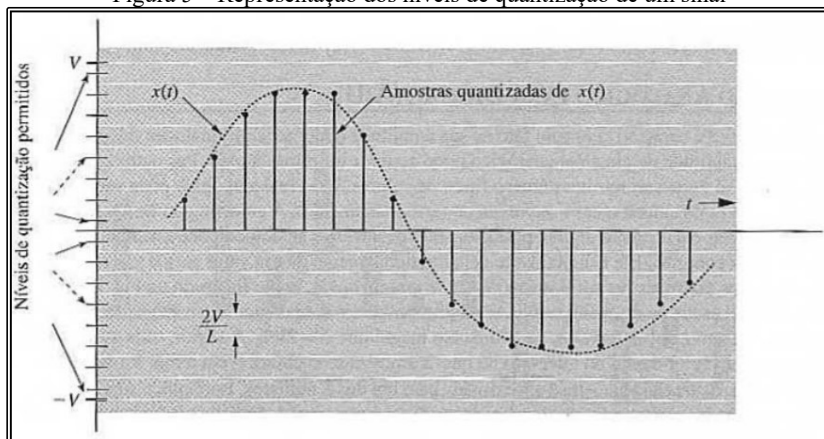
Toda essa configuração permite que esse microcomputador suporte a execução de sistemas operacionais, facilitando a implementação de rotinas de *software*, uma vez que elas podem ser programadas diretamente dentro dele.

### 3.1.2 Conversores Analógico-Digitais

Segundo Lathi (2007), um sinal analógico é caracterizado pelo fato de sua amplitude poder assumir qualquer valor em uma faixa contínua. Por outro lado, a amplitude de um sinal digital só pode assumir um número finito de valores. Um sinal analógico pode ser convertido em

digital através da amostragem e quantização. Na quantização de uma amostra do sinal, a amplitude da amostra é arredondada para o valor mais próximo possível de ser representado pelo sistema quantizador, como mostrado na imagem abaixo:

Figura 5 – Representação dos níveis de quantização de um sinal



Fonte: Lathi (2007)

Os valores arredondados por sua vez são associados à equivalentes binários, como exibido na tabela a seguir, para poderem ser transmitidos via meios de comunicação digitais:

Tabela 1 - Associação entre amplitudes e valores binários

Dígito	Equivalente Binário	Forma de onda do pulso codificado
0	0000	
1	0001	
2	0010	
3	0011	
4	0100	
5	0101	
6	0110	
7	0111	
8	1000	
9	1001	
10	1010	
11	1011	
12	1100	
13	1101	
14	1110	
15	1111	

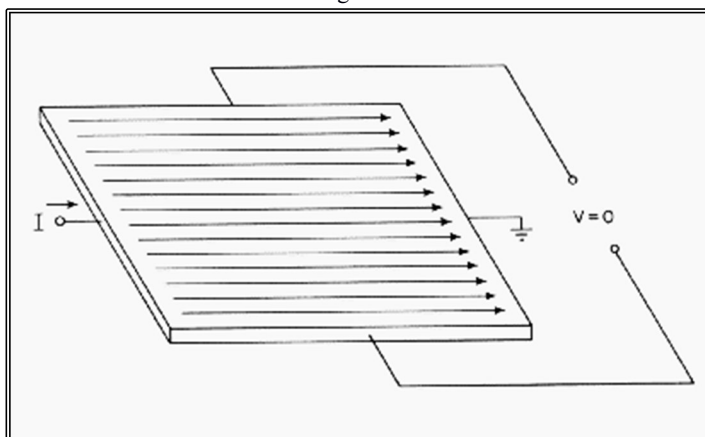
Fonte: Lathi (2007)

### 3.1.3 Sensores de efeito Hall

Segundo Neis (2000), O efeito Hall se caracteriza basicamente pelo aparecimento de um campo elétrico transversal em um condutor percorrido por uma corrente elétrica, quando o mesmo se encontra mergulhado em um campo magnético.

Esse comportamento pode ser observado nas imagens abaixo:

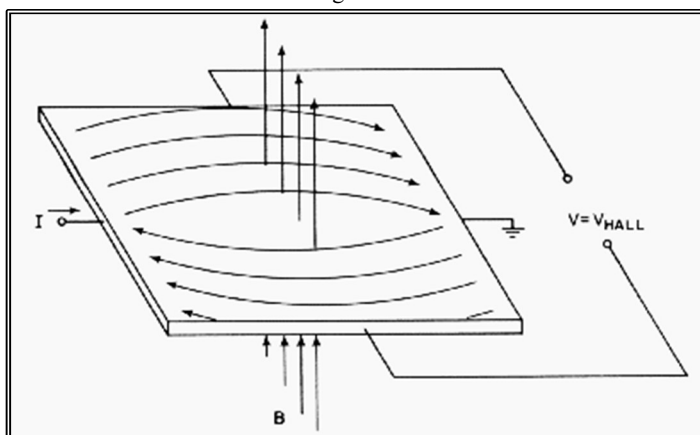
Figura 6 - Representação de um sensor de efeito hall na ausência de um campo magnético



Fonte: Neis (2000)

Na imagem acima, a distribuição de corrente sobre o material semicondutor é uniforme, e, não existe diferença de potencial na saída.

Figura 7 - Representação de um sensor de efeito hall na presença de um campo magnético



Fonte: Neis (2000)

Com a presença de um campo magnético, o fluxo de corrente é distorcido, e, a distribuição resultante provoca o aparecimento de uma diferença de potencial entre os terminais de saída.

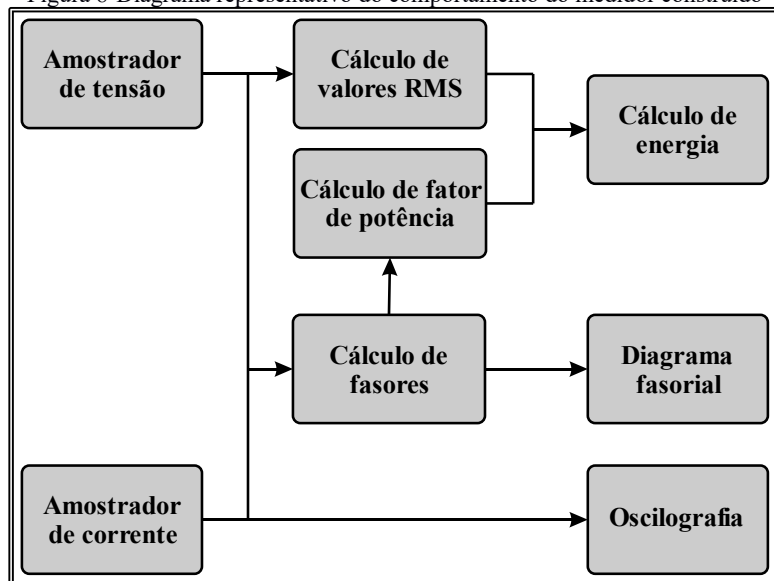
Ainda segundo Neis (2000), o sinal do sensor de efeito hall é muito fraco, da ordem de 20 a 30 microvolts para um campo magnético de 1 Gauss, necessitando de um amplificador com características de alta impedância, baixo ruído e ganho considerável.

## 3.2 PROJETO E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

### 3.2.1 Diagrama de funcionamento do medidor

Abaixo é exibido um diagrama resumido do funcionamento do medidor:

Figura 8-Diagrama representativo do comportamento do medidor construído



Fonte: O autor (2018)

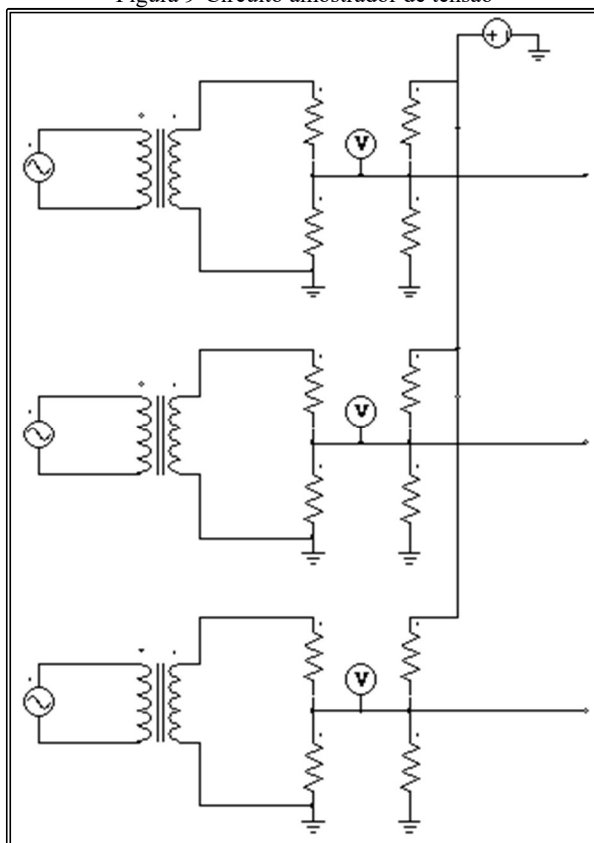
É possível observar certa semelhança com o modelo exposto na seção 2.2 pois o princípio de funcionamento é quase o mesmo, com a principal diferença sendo que o modelo desenvolvido neste trabalho tem como entradas amostras instantâneas das ondas de sinais de tensão e corrente, enquanto o diagrama da seção anterior trabalha diretamente com os valores eficazes (RMS) dessas grandezas.

### 3.2.2 Descrição do circuito

Uma parte essencial para o funcionamento do dispositivo é o circuito amostrador de tensão. Esse circuito tem como objetivo transformar o sinal de tensão da rede para um sinal que possa ser interpretado pelo conversor analógico-digital (A/D).

O circuito pode ser visualizado na imagem abaixo:

Figura 9-Circuito amostrador de tensão



Fonte: O autor (2018)

Na primeira fase, um transformador de potencial reduz a tensão de 220V RMS na entrada para 3V RMS, ou, aproximadamente 4,1V de pico, em seguida, um divisor de tensão composto por 4 resistores faz a divisão dessa amplitude por 2 e aplica um *offset* de 2,5V, fazendo com que o sinal

resultante varie na faixa de 0,5 a 4,5V centrado em 2,5V, isso é feito para possibilitar que o conversor A/D leia esse sinal, uma vez que esse conversor é capaz de ler sinais dentro de sua faixa de alimentação, que, nesse caso vai de 0 a 5V. Antes do conversor A/D existe um amplificador operacional utilizado como *buffer*, apenas para proteger o conversor A/D de descargas de corrente.

A descrição acima se aplica também às outras duas entradas de tensão, permitindo a leitura de sistemas trifásicos.

Para o sinal de corrente, utilizou-se um sensor de efeito hall ACS712 com capacidade de corrente de até 20A e cuja saída também é centrada em 2,5V e varia de 0,5 a 4,5V. A saída do sensor é diretamente ligada a um dos canais do conversor A/D pois é uma saída de tensão.

A descrição do circuito de medição de corrente acima se aplica também às outras duas entradas de corrente, permitindo a leitura de sistemas trifásicos.

Após o conversor A/D, todo o tratamento é realizado no microprocessador, e será explicado nas seções a seguir.

### 3.3 ESCOLHA DOS COMPONENTES

#### 3.3.1 Cálculo dos resistores

Conhecendo-se o sinal de entrada e o sinal desejado na saída, foi possível calcular o valor dos resistores a serem utilizados no circuito, utilizando-se as equações provenientes das leis de Kirchhoff e a lei de Ohm.

A lei de Kirchhoff dos nós diz que a soma de todas as correntes que entram e saem de um nó é sempre igual a zero:

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0 \quad (1)$$

A lei de Kirchhoff das malhas diz que a soma de todas as diferenças de potenciais em uma malha fechada é igual a zero:

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0 \quad (2)$$

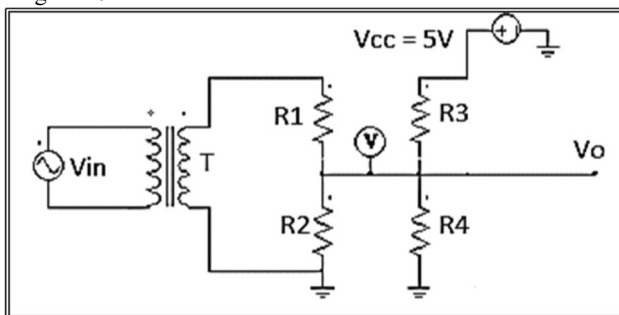
A lei de Ohm diz que o valor de uma resistência elétrica é igual à razão entre a tensão sobre essa resistência e a corrente que a percorre:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$



Para o cálculo, utiliza-se apenas uma das fases, e depois o resultado é replicado para as outras. O circuito de uma das fases fica como exibido abaixo:

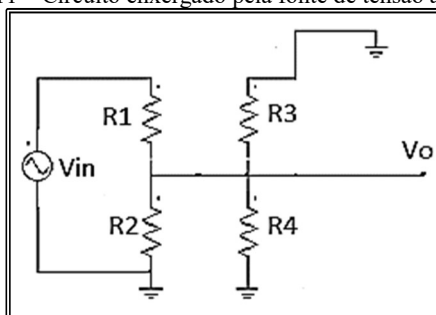
Figura 10 – Circuito de uma das fases do amostrador de tensão



Fonte: O autor (2018)

Como existem duas fontes de tensão, sendo uma alternada e outra contínua, o cálculo pode ser realizado utilizando-se o teorema da superposição, que diz que um dado valor de uma grandeza é resultado das contribuições independentes de cada fonte de tensão ou corrente sozinhas, sem que as outras estejam presentes no circuito. Dessa forma, o cálculo é realizado em etapas, sendo a primeira, levando em consideração apenas a fonte de tensão alternada:

Figura 11 – Circuito enxergado pela fonte de tensão alternada



Fonte: O autor (2018)

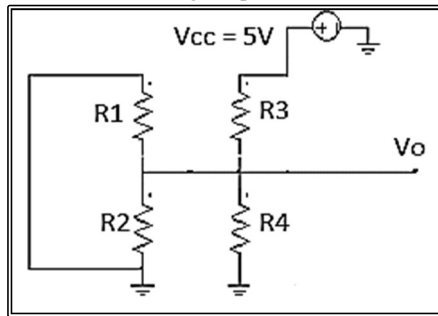
A saída desse circuito deve ser uma tensão alternada com 2V de pico ( $V_o' = 2V$ ),  $V_{in}$  tem valor 4V alternado, portanto é necessário fazer um divisor de tensão onde as duas resistências têm o mesmo valor, e, visto

que R2, R3 e R4 estão em paralelo, é necessário que esse arranjo em paralelo tenha o mesmo valor de R1.

$$R1 = R2 // R3 // R4$$

A segunda etapa é a análise do circuito enxergado pela fonte de tensão contínua, que é o seguinte:

Figura 12 – Circuito enxergado pela fonte de tensão contínua



Fonte: O autor (2018)

A saída desse circuito deve ser uma tensão contínua de valor 2,5V ( $V_o = 2,5V$ ),  $V_{cc}$  tem 5V, portanto, é necessário fazer um divisor de tensão onde as duas resistências têm o mesmo valor, como no caso anterior, a diferença agora é que nesse caso R1, R2 e R4 estão em paralelo, portanto, é necessário que esse arranjo em paralelo tenha o mesmo valor de R3.

$$R3 = R1 // R2 // R4$$

Uma maneira de atender aos dois requisitos é escolher valores de resistências extremamente altos para R2 e R4, e fazer R1 e R3 terem o mesmo valor bem mais baixos que os anteriores, dessa forma o paralelo entre os valores extremamente altos e o valor mais baixo terá resultante praticamente igual ao valor mais baixo, que será também, igual ao valor da resistência em série.

Dessa forma os valores escolhidos para os resistores foram:

$$R1 = R3 = 10K\Omega$$

$$R2 = R4 = 1M\Omega$$

E pelo teorema da superposição, o valor final de  $V_o$  é:

$$V_o = V_o' + V_o''$$

Que corresponde a uma tensão alternada de 2V com um offset de 2,5V contínuos.

Por fim realizou-se a simulação desse circuito para confirmar a escolha dos valores. A simulação foi realizada utilizando-se o *software* PSIM. A escolha se deu pela relação de praticidade e abrangência desse *software*.

Os resistores restantes são os utilizados nos *buffers* de proteção do amostrador. Para esses resistores, a única restrição de valor é que a resistência de entrada seja igual a de saída, e os valores escolhidos foram de  $1K\Omega$ .

### 3.3.2 Compra dos componentes

Após a simulação do circuito de tratamento dos sinais os valores nominais correspondentes a cada componente do circuito amostrador de tensão estavam definidos, restando encontrar fornecedores e fazer a compra.

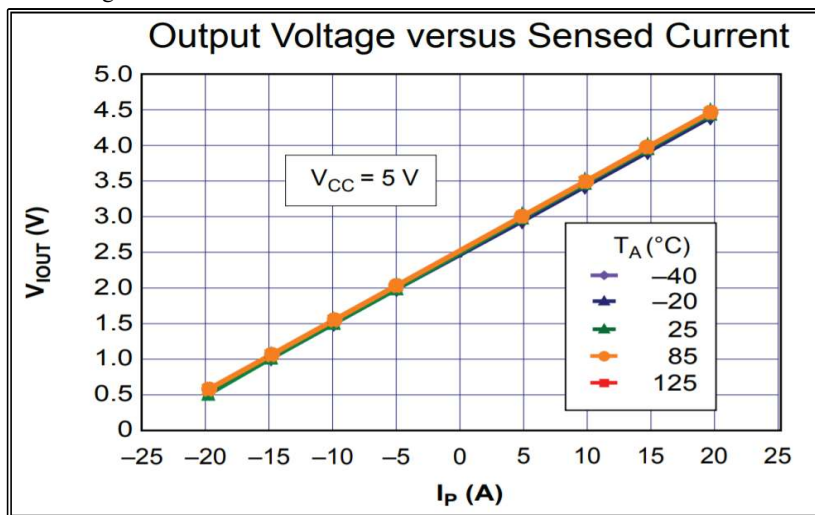
Após uma extensa busca os transformadores escolhidos foram de capacidade de corrente de 100mA, devido ao pequeno tamanho, pois a corrente trafegando por eles seria muito baixa e esse valor foi o menor encontrado.

Em seguida foram comprados os resistores, dos quais 6 eram de  $1k\Omega$ , 6 de  $10k\Omega$ , e 6 de  $1M\Omega$ . Para a compra foram escolhidos resistores com erro de 1%.

Os amplificadores operacionais utilizados foram do tipo 741 contidos em um Circuito Integrado (CI) do tipo LM324N.

Os sensores de efeito hall utilizados foram do modelo ACS712 devido à grande capacidade de corrente, ótima linearidade, e baixo custo comparado a outros sensores de efeito hall comerciais. A curva característica desse sensor pode ser vista na imagem a seguir:

Figura 13 - Curva Tensão x Corrente do sensor de efeito hall ACS712



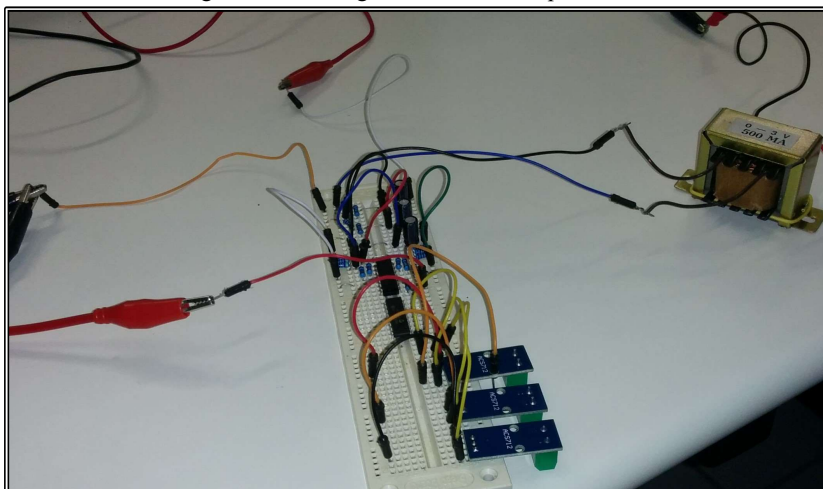
Fonte: Allegro MicroSystems: ACS712 Datasheet

Por último, na escolha de um conversor analógico digital, era necessário um componente capaz de ler no mínimo 6 canais, sendo 3 de tensão e 3 de corrente, além disso, era necessária uma precisão razoável, de forma a diminuir os erros por quantização. Por último, era necessário que o conversor suportasse uma taxa de amostragem de no mínimo 720 amostras por segundo, permitindo uma amostragem de 120 amostras por segundo em cada canal. Esse pré-requisito era o mínimo para que a amostragem da onda superasse a taxa de Nyquist evitando *aliasing* entre os espectros dos sinais amostrados. Dados cenários práticos, era necessário ainda que essa taxa fosse mais alta, facilitando a implementação de filtros na reconstituição do sinal. Considerando todos os pré-requisitos, o conversor A/D escolhido foi o MCP3008, capaz de amostrar 8 canais com uma taxa total de 200 mil amostras por segundo, muito acima da frequência mínima necessária e com 10 bits de precisão totalizando 1023 limiares de quantização.

### 3.4 MONTAGEM EM PROTOBOARD

Após a escolha e compra dos componentes começou-se a primeira etapa de montagem para testes, que se deu em uma *protoboard*, nela foi elaborado o circuito de amostragem correspondente a um dos canais de tensão, que pode ser visto na imagem abaixo:

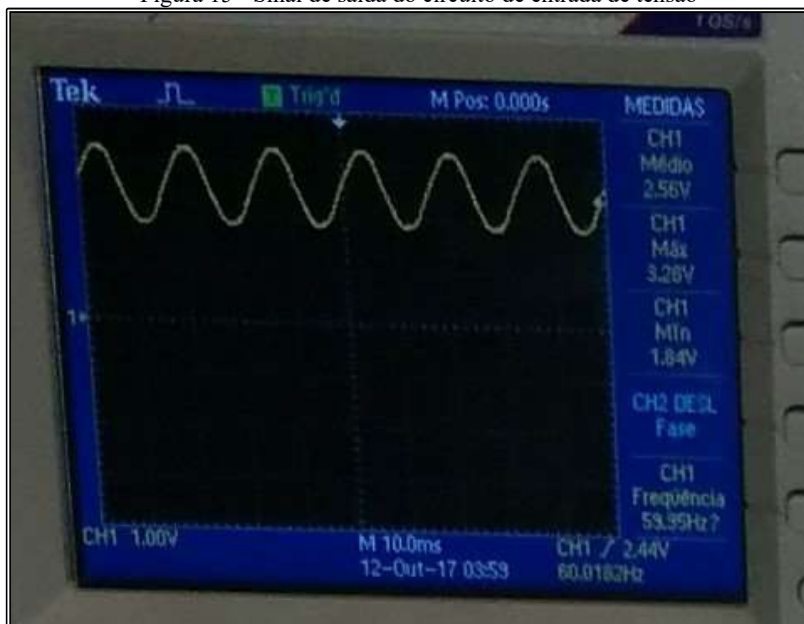
Figura 14 - Montagem do circuito em protoboard



Fonte: O autor (2018)

A saída desse circuito é uma onda senoidal de amplitude 0.7V e centrada em 2,5V, exibida na imagem a seguir:

Figura 15 - Sinal de saída do circuito de entrada de tensão



Fonte: O autor (2018)

Com esse circuito montado e testado validou-se a simulação do circuito amostrador de tensão, que, é a parte principal que permite o funcionamento de todo o sistema.

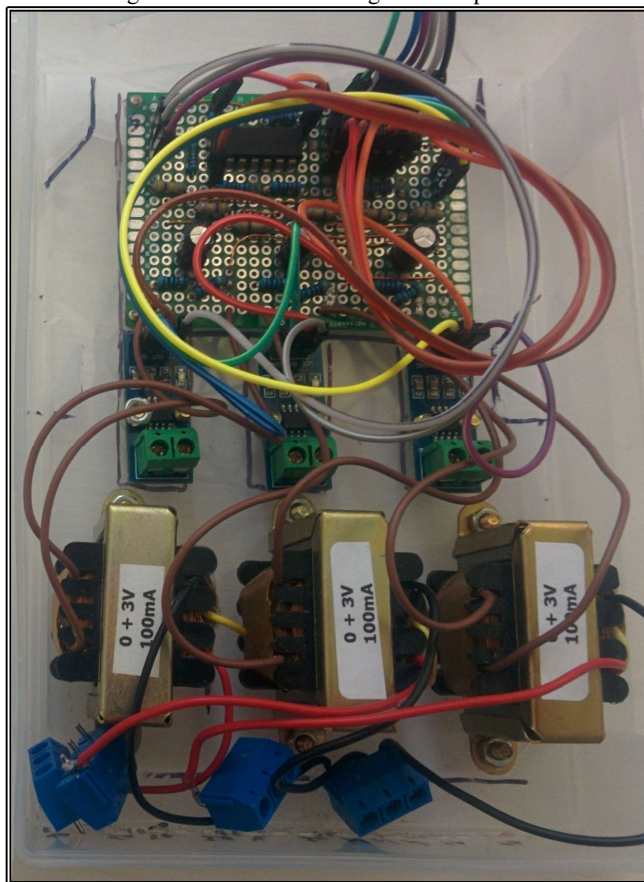
Vale ressaltar que alguns problemas foram encontrados na montagem em *protoboard*, mas depois de uma análise mais precisa percebeu-se que eles ocorriam devido ao aspecto construtivo da própria *protoboard*, e, não seriam propagados para a placa final.

### 3.5 PRIMEIRA MONTAGEM DO CIRCUITO E TESTES

Uma vez validado a montagem do circuito na *protoboard*, o próximo passo seria a montagem definitiva que eliminaria os problemas atribuídos à *protoboard* e daria ao projeto uma estrutura independente e fixa, evitando problemas de contato ou outras situações semelhantes.

Com esse objetivo, utilizou-se uma caixa de plástico transparente fino, de maneira a fixar todos os módulos do projeto, e, para o circuito, utilizou-se uma placa ilhada. O resultado da montagem pode ser visto na imagem a seguir:

Figura 16 - Primeira montagem do dispositivo



Fonte: O autor (2018)

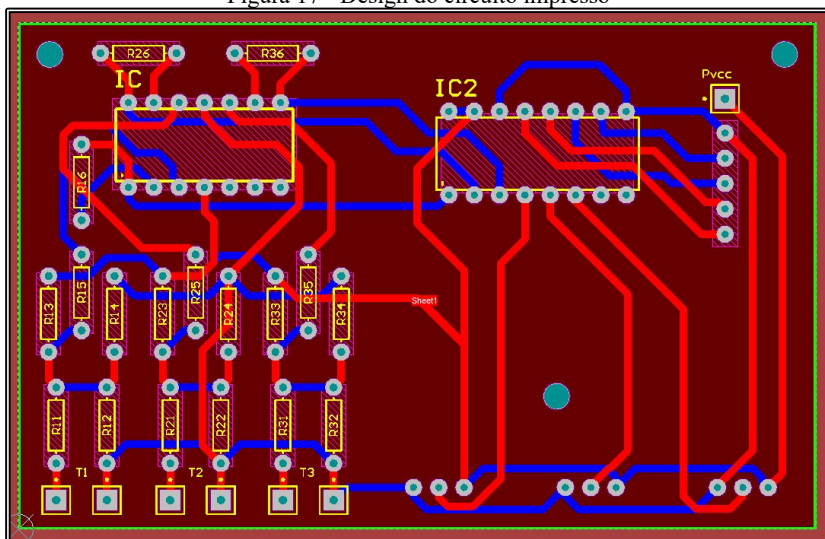
Nota-se que, apesar de funcionar, a montagem não ficou visivelmente agradável, nem mesmo fisicamente robusta, de forma que os componentes fixados na placa ilhada acabavam por se desconectarem quando submetidos a certo esforço mecânico. Vale ressaltar que existem portarias e normas que regulamentam aspectos relacionados à robustez dos medidores de energia, submetendo-os a níveis de temperatura e umidade elevados, bem como intenso esforço mecânico, para garantir que eles operem normalmente em qualquer região. Apesar de o objetivo do trabalho não ser fazer um medidor que seja aprovado nesses quesitos, decidiu-se realizar uma outra montagem, dessa vez prestando mais atenção a detalhes estruturais do sistema, e não apenas o funcionamento.

### 3.6 PROJETO E FRESA DA PLACA

Com o objetivo de tornar o projeto mais fisicamente robusto e esteticamente agradável, e, como bônus desenvolver e aplicar conhecimentos relacionados a projetos de PCB, decidiu-se refazer o projeto do circuito anteriormente montado sobre uma placa ilhada em uma placa fresada especificamente para o objetivo proposto, para isso, utilizou-se o *software* Altium Designer.

O circuito projetado no *software* pode ser visto na imagem abaixo:

Figura 17 - Design do circuito impresso



Fonte: O autor (2018)

Essa imagem mostra o circuito depois dos ajustes necessários para a fresa, que foi efetuada pelo INEP.

Algumas modificações foram feitas no circuito durante essa etapa, como por exemplo, o posicionamento dos pinos de saída que tornam a placa um módulo independente, de forma a permitir que ela seja utilizada com outros microprocessadores caso seja feita alguma melhoria do projeto no futuro, desde que as características desses microprocessadores estejam de acordo com os valores nominais dos componentes da placa.

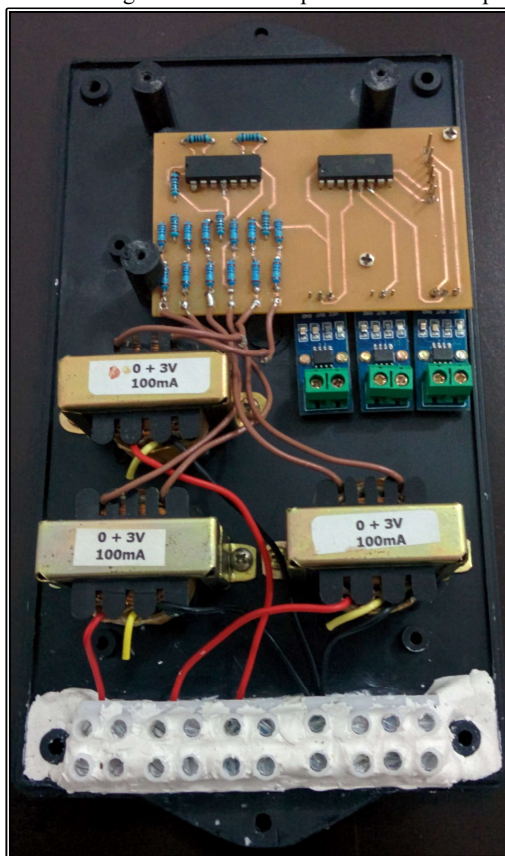
Com posse dessa placa, a montagem do circuito de forma confiável foi extremamente facilitada.



### 3.7 MONTAGEM DO CIRCUITO E TESTES

Além da placa de circuito impresso, também foi alterada a caixa que continha todos os módulos do projeto. Devido à falta de robustez da caixa anteriormente usada, optou-se por uma caixa de patola para a montagem final do circuito, que, ao fim da montagem ficou como exibido na imagem abaixo:

Figura 18 - Montagem interna do dispositivo sem o Raspberry Pi



Fonte: O autor (2018)

Uma vez fixados todos os módulos, restava apenas conectá-los e passar para a etapa de programação do microprocessador, que utilizaria os valores das amostras obtidas pelo circuito convertidas em sinais de 10

bits para realizar todos os cálculos e inferir os valores das grandezas correspondentes ao sinal elétrico da rede a qual o medidor seria conectado.

### 3.8 PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR

Finalizada a parte referente ao *hardware* do projeto, o resto da implementação se daria em nível de *software*, que foi implementado em uma Raspberry Pi 3 modelo B, que possui uma arquitetura contendo um microprocessador Arm capaz de rodar um sistema operacional de kernel Linux. Essa capacidade permite que o medidor seja uma plataforma independente, não necessitando de computadores ou outros sistemas externos para executar alguma função específica, aumentando assim as possibilidades de implementação.

A linguagem utilizada para a implementação do *software* foi C++ devido à velocidade de processamento e às bibliotecas existentes. Em um primeiro momento cogitou-se utilizar Python, que é uma linguagem de nível mais alto executada sobre a linguagem C, porém, após alguns testes de performance percebeu-se que ela afetava drasticamente as taxas de amostragem da Raspberry Pi.

Durante os itens a seguir serão descritos os módulos do *software* e suas respectivas funções. A explicação tentará seguir uma ordem cronológica dos eventos que ocorrem dentro do código.

#### 3.8.1 Descrição do funcionamento

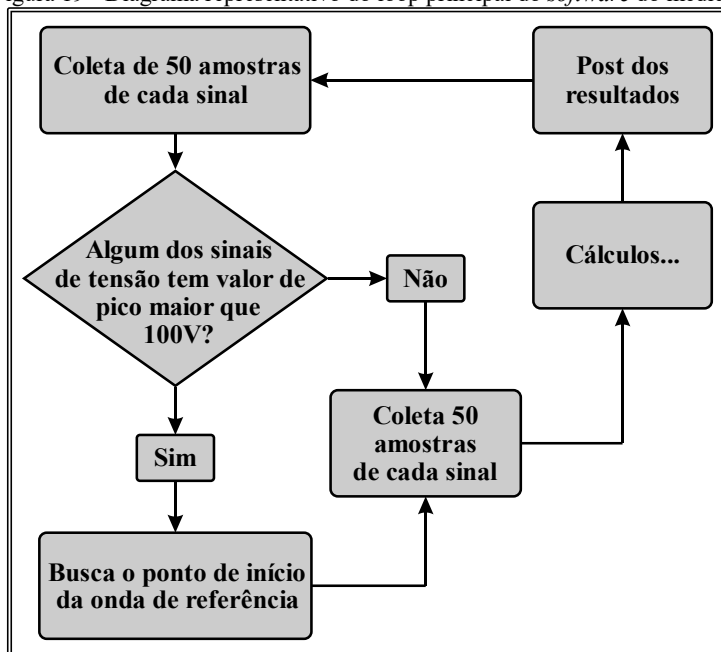
O programa é composto de 7 módulos de forma a torná-lo mais organizado. Cada módulo contém descrição de funções específicas que são utilizadas pelo módulo principal para executar a estimação das grandezas elétricas.

Ao início do programa o mesmo toma medidas para reduzir a interferência de processos secundários do sistema operacional na execução da rotina, em seguida, inicializa a biblioteca referente ao controle do conversor A/D MCP3008. Essa biblioteca foi obtida de WiringPi.

Em seguida são inicializadas as classes responsáveis por armazenar os valores das grandezas de cada fase do sistema elétrico medido, e as tabelas do banco de dados que serão usadas para armazenar os valores das grandezas calculadas.

Ao entrar no loop principal, o programa segue um fluxo como descrito no diagrama a seguir:

Figura 19 - Diagrama representativo do loop principal do *software* do medidor



Fonte: O autor (2018)

Em um primeiro momento, ele coleta 50 amostras de cada um dos sinais de tensão das 3 fases, a uma frequência de aproximadamente 3kHz por sinal, obtendo o equivalente a um período de cada sinal.

Vale ressaltar que os valores lidos pelo microprocessador estão na escala de 0 a 1023, sendo que uma tensão de valor 0V é entendida pelo microprocessador como tendo valor 512, então é realizada uma conversão interna no código para traduzir esses valores. Essa conversão utiliza algumas relações do circuito físico, como a relação de transformação dos TPs na entrada do medidor, o divisor de tensão logo após o secundário desse transformador, e a relação de 5V para o valor 1024. Dessa forma a conversão é descrita como:

$$V = RTP * \frac{1}{2} * \frac{5}{1024} * Valor \text{ lido do amostrador} \quad (4)$$

$$I = RTC * \frac{5}{1024} * Valor \text{ lido do amostrador} \quad (5)$$

Com os valores das amostras de cada sinal armazenados, o *software* verifica se o valor correspondente ao pico da onda de tensão da fase A é maior do que 100V, e, em caso positivo, ele entende que existe um sinal válido presente nessa fase. Em caso negativo ele repete o processo para as duas fases seguintes para que uma delas seja a referência nos cálculos a serem executados. Caso nenhuma das fases cumpra essa condição ele entende que as 3 fases estão ausentes.

Ao saber qual das fases usar como referência o programa passa a realizar amostras unicamente dessa fase, aguardando o momento em que ela cruza o eixo X em subida, de forma que para efeitos de representação fasorial essa onda tenha fase 0 graus, e, as outras estejam defasadas em referência a essa.

Ao encontrar o ponto de início da onda o *software* passa a amostrar os 6 sinais (3 tensões e 3 correntes) a partir daquele instante, e, novamente coleta 50 amostras de cada sinal a uma taxa de aproximadamente 3kHz por sinal.



Uma vez que todas essas amostras estão armazenadas na memória do programa, o passo seguinte consiste nas rotinas de cálculos das grandezas elétricas.

### **3.8.2 Cálculos das grandezas elétricas**

A primeira etapa dos cálculos é a determinação dos valores de picos dos 6 sinais.

Em seguida, com o valor dos picos em mãos o *software* calcula o fasor que representa cada um dos sinais. O módulo do fasor é o próprio valor de pico da onda, porém para encontrar a fase o sistema utiliza algumas regras mais complexas. O primeiro cálculo consiste em obter o arco seno da divisão entre a primeira amostra e o valor de pico da onda. Com esse valor em mãos, verifica-se se o primeiro pico da onda é positivo ou negativo, e infere-se o valor conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 - Definição dos ângulos dos fasores de cada sinal

Representação da onda	Descrição da onda	Ângulo do fasor
	Início em 0 e primeiro pico positivo.	0°
	Início no pico positivo.	90°
	Início em 0 e primeiro pico negativo.	180°
	Início no pico negativo	270°
	Início acima de 0 e primeiro pico positivo.	Arcoseno da amostra inicial sobre o pico
	Início acima de 0 e primeiro pico negativo.	180° - Arcoseno da amostra inicial sobre o pico
	Início abaixo de 0 e primeiro pico negativo.	Arcoseno da amostra inicial sobre o pico
	Início abaixo de 0 e primeiro pico positivo.	180° - Arcoseno da amostra inicial sobre o pico

Fonte: O autor (2018)

Tendo os fasores determinados com amplitude e fase segundo a estrutura abaixo:

$$Vp\angle\theta v \tag{6}$$

$$Ip\angle\theta i \tag{7}$$

Onde  $Vp$  representa o valor de pico do sinal de tensão,  $Ip$  representa o valor de pico do sinal de corrente,  $\theta v$  representa a fase do fasor de tensão e  $\theta i$  representa a fase do fasor de corrente.

3.8.2.1 Valores eficazes

O *software* procede ao cálculo dos valores eficazes de cada onda. Esse valor corresponde ao equivalente contínuo que transmite a mesma potência que o sinal alternado.

Para ondas senoidais esse cálculo consiste apenas na divisão do valor de pico da onda por raiz de 2, como mostrado na equação abaixo:

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

### 3.8.2.2 Fator de potência

O cálculo seguinte é o dos fatores de potência. Em Corrente Alternada perfeitamente senoidal, define-se fator de potência como sendo o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente de cada respectiva fase.

$$Fp = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (10)$$

### 3.8.2.3 Potências

Com todos os valores acima conhecidos o *software* procede ao cálculo das potências, sendo a potência aparente igual ao produto dos valores eficazes da tensão e corrente de cada fase.

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (11)$$

O valor da potência ativa é o produto do fator de potência de cada fase e a potência aparente da respectiva fase.

$$P = S * Fp \quad (12)$$

E o valor da potência reativa é igual ao produto entre o seno da subtração dos ângulos de tensão e de corrente com a potência aparente.

$$Q = S * \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (13)$$

### 3.8.2.4 Energias

Por fim, o cálculo dos valores de energia consiste da integração dos valores de potência no tempo.

$$E_{aparente} = \int_0^{t(horas)} S(t)dt \quad (14)$$

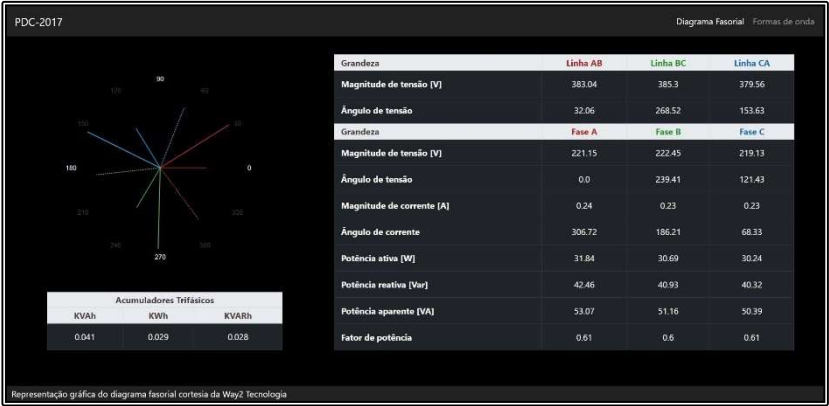
$$E_{ativa} = \int_0^{t(horas)} P(t)dt \quad (15)$$

$$E_{reativa} = \int_0^{t(horas)} Q(t)dt \tag{16}$$

Todos os valores calculados nesse processo são salvos em tabelas de um banco de dados interno do medidor. Isso é feito para que seja possível ler esses valores a partir de uma aplicação terceira com uma simples requisição pela rede, porém, como a proposta do trabalho é criar um sistema autônomo, essa aplicação foi desenvolvida em Javascript e implementada internamente no medidor, de forma que um simples acesso ao endereço de IP dele a partir de qualquer dispositivo que possua um navegador de internet permite a leitura direta das grandezas que ele calcula.

Abaixo seguem exemplos das telas desse *software*:

Figura 20 - Tela de consulta do diagrama fasorial do medidor

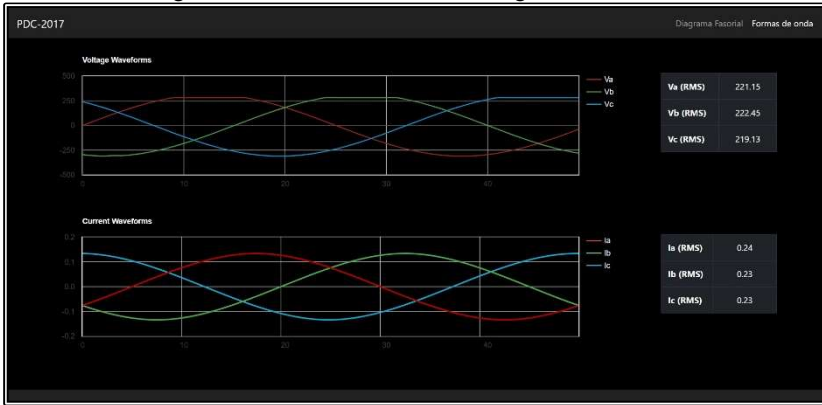


Fonte: O autor (2018)

A imagem acima ilustra a tela de representação do diagrama fasorial referente à rede elétrica na qual o medidor estiver instalado. Na tabela da direita ele exibe os valores instantâneos das grandezas medidas, como tensões e correntes, com seus respectivos ângulos, potências e fator de potência. A representação visual dos fasores de tensão e corrente se encontra a esquerda da tabela, abaixo dessa representação se encontra a tabela que contém os 3 valores dos acumuladores de energia que são incrementados com o tempo usando os valores de potência.

A outra tela desse sistema exibe as amostras coletadas pelo medidor que foram utilizadas para os cálculos, um exemplo dessa tela pode ser visto na imagem a seguir:

Figura 21 - Tela de consulta de oscilografia do medidor



Fonte: O autor (2018)

Nessa tela os valores das amostras coletadas pela Raspberry Pi e convertidas utilizando as equações (4) e (5) são plotadas em um gráfico que as conecta utilizando método de Simpson para representação visual.

### 3.9 TESTES E RESULTADOS

#### 3.9.1 Problemas encontrados

Apesar de o medidor efetuar o que é proposto, algumas situações foram encontradas durante o desenvolvimento. Dessas, algumas são intrínsecas do modelo escolhido, outras simplesmente não foram previstas, e algumas puderam ser contornadas.

O primeiro item a ser levantado diz respeito a precisão das medidas. No início do desenvolvimento optou-se por utilizar um conversor analógico-digital com precisão de 10 bits pois acreditou-se que 1024 amplitudes dariam uma precisão razoável, uma vez que utilizando toda a escala, o erro máximo de quantização seria da ordem de 0.00245V como mostrado pelo cálculo abaixo:

$$\Delta = \frac{5}{1023} = 0.0049V$$

Dado que o erro máximo de quantização é igual a  $\Delta/2$ :

$$\Delta/2 = 0.00245V$$



O que não foi levado em consideração foi que a escala não seria 100% utilizada por motivos de aspecto prático da montagem e para não correr o risco de um sinal ultrapassar a escala. Dessa forma os valores não variaram de 0 a 1023, mas na prática variaram na verdade entre 0 e 760 aproximadamente, fazendo com que o erro de quantização seja:

$$\Delta = \frac{5}{759} = 0.0067V$$

$$\Delta/2 = 0.00334V$$

Multiplicando esse erro pelas relações dos transformadores e dos divisores de tensão, como mostrados nas equações (4) e (5), para chegar nas grandezas do sistema medido faz com que o erro de quantização seja da ordem de 1V. Um erro muito maior do que o esperado no início do desenvolvimento.

Outra situação encontrada está relacionada ao *offset* aplicado sobre os sinais de tensão no *hardware*. Esse *offset* deveria ser de 2,5V como especificado no início do projeto, porém, durante a montagem não foi levado em conta alguns aspectos relacionados a indutâncias dos transformadores, de forma que quando o medidor está desligado o *offset* fica na ordem de 2,5V como especificado, mas, quando existe um sinal de tensão no circuito, esse *offset* diminui para 2,3V. Isso faz com que a subtração de 512 amostras para centrar o sinal em 0V não tenha o resultado esperado, uma vez que na medição o centro da onda fica na ordem de 430.

Essa situação pôde ser contornada no *firmware* do medidor, calculando o centro da onda com base na distância entre os valores de pico positivo e negativo das ondas. Dessa forma a onda fica sempre centrada em 0V e todos os cálculos acontecem normalmente.

O último caso encontrado foi de que apesar de todos os sinais do circuito estarem dentro das faixas especificadas, sem ultrapassar nenhum limiar, durante a amostragem a parte positiva das ondas de tensão satura em um valor um pouco abaixo do pico. A principal consequência desse caso é que em alguns momentos o ângulo do fasor dessa onda, cuja estimativa é demonstrada na Tabela 2 do item 3.8.2, traz um valor errado. Esse problema de saturação foi mapeado até os amplificadores operacionais utilizados como *buffer* logo antes das entradas do conversor A/D e uma das possíveis correções pensadas envolve substituir o CI dos amplificadores e reposicionar esse *buffer* para logo depois dos divisores de tensão que estão posicionados no secundário dos TPs de entrada do

medidor. Dessa forma o divisor de tensão ficaria isolado do circuito que realiza o *offset*.

Essa realocação possivelmente resolveria também o problema de *offset* comentado anteriormente, e, permitiria que se a saturação da onda ainda ocorresse, pudesse ser alterado o valor dos resistores do divisor de tensão para reduzir a amplitude da onda amostrada até um valor abaixo da saturação sem impactar no *offset* e, tendo como consequência negativa, apenas uma perda de precisão. Como essa mudança exigiria refazer a placa exibida no item 3.6 o projeto foi finalizado sem a solução desse problema por não restar tempo disponível para ajustar.

Por fim, resguardado das situações descritas acima, o medidor realiza o que é proposto, sendo um dispositivo autônomo que utiliza amostras coletadas de um sistema elétrico ao qual ele está instalado para aferir as grandezas referentes às características desse sistema, e, com isso, calcular o valor aproximado do consumo de energia desse sistema.





## 4 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um medidor eletrônico de energia elétrica, efetuando-se todas as etapas referentes ao desenvolvimento de um produto baseado em *hardware*, como, projeto, pesquisa de fornecedores, montagem, correções, etc.

O medidor construído realiza todas as funções propostas apesar de alguns problemas encontrados ao final da implementação, que, não estão relacionados ao mecanismo de funcionamento do medidor, mas, a meros aspectos construtivos como características de componentes que não puderam ser simuladas.

Existem várias ideias a serem sugeridas como trabalhos futuros nesse projeto. É possível incluir funções nesse medidor sem nenhuma alteração de *hardware*, como por exemplo, o cálculo de harmônicos, realizando no código uma transformada rápida de Fourier com as amostras dos sinais. Essa função traria muito valor para o projeto, pois as informações de distorções harmônicas são valiosíssimas para os agentes do setor elétrico preocupados com a qualidade da energia.

Outras melhoras no projeto podem estar relacionadas a substituição da Raspberry Pi por um microprocessador mais robusto para esse tipo de aplicação, permitindo que o medidor faça amostragens e cálculos mais precisos e mais rápidos.

A simples substituição do conversor analógico-digital teria um impacto próximo dessa melhora de desempenho.



## REFERÊNCIAS

MEDEIROS FILHO, Solon de. Medição de Energia Elétrica. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 483 p.

LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 856 p. Tradução de Gustavo Guimarães Parma.

OLIVEIRA, José Carlos de; OLIVEIRA, Lucas Tiago; FILIAGI, Raquel. Qualidade da energia elétrica. O Setor Elétrico, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/qualidade-da-energia-eletrica/>>. Acesso em: 18 maio 2018.

ENGENHEIROS ASSOCIADOS. MEDIÇÕES / ESTUDOS DE QUALIDADE DE ENERGIA. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://engenheirosassociados.com.br/home/index.php/servicos/medicoes-estudos-de-qualidade-de-energia/>>. Acesso em: 18 maio 2018.

ANEEL. POR DENTRO DA CONTA DE LUZ: INFORMAÇÃO DE UTILIDADE PÚBLICA. Brasília: Assessoria de Comunicação e Imprensa, 2008. 32 p. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha\\_1p\\_atual.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_1p_atual.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2018.

MÍNGUEZ, Agustín. Medidores de energia ativa: Funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2018.

PINCHEMEL, Rodrigo. Sistemas de medição de Energia Elétrica. 2012. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2012. Disponível em: <[http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAG\\_kAD/capitulo-2-sistemas-medicao-energia-eletrica](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAG_kAD/capitulo-2-sistemas-medicao-energia-eletrica)>. Acesso em: 18 maio 2018.

NOVA ELETRONICA. Medidor de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://blog.novaeletronica.com.br/medidor-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 18 maio 2018.

XDEVS. Raspberry Pi 3 diagram. Disponível em: <<https://doc.xdevs.com/doc/RPi/pi3-block-diagram-rev4.png>>. Acesso em: 18 maio 2018.

WIKIPEDIA. Raspberry Pi. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)>. Acesso em: 18 maio 2018.

ELEMENT 14. Raspberry Pi 3 Model B. Disponível em: <<https://www.element14.com/community/docs/DOC-81294?ICID=spotlight-result-designcenter#downloads>>. Acesso em: 18 maio 2018.

NEIS, Paulo. Transdutores de Corrente por Efeito Hall. 2000. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/neis/#teoria>>. Acesso em: 18 maio 2018.

WIRING Pi: GPIO Interface library for the Raspberry Pi. GPIO Interface library for the Raspberry Pi. 2018. Disponível em: <<http://wiringpi.com/>>. Acesso em: 18 maio 2018.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 19 maio 2018.



## APÊNDICE A – Tabela de custos do projeto

Tabela 3 - Custos do Projeto

Componente	Preço (R\$)
3 Transformadores de potencial 220/3V	45.00
3 Sensores de efeito Hall ACS712	64.50
1 Caixa de patola (19,5 x 5,5 x 11cm)	33.00
1 Fileira de 12 conectores de polietileno	8.00
6 Resistores $1M\Omega^*$	0.50
6 Resistores $10K\Omega^*$	0.50
6 Resistores $1K\Omega^*$	0.50
1 CI Amplificador operacional LM324N	1.50
1 CI Conversor analógico-digital MCP3008	1.50
1 fileira de 12 pinos	0.80
1 Conjunto de jumpers fêmea-fêmea	5.00
1 Raspberry Pi 3 <i>Model B</i>	250.00
1 Fonte microUSB de 5V e 3A	50.00
22 Parafusos 3mm	5.21
TOTAL	466.01

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

\* Preço de um pacote com 20 unidades